

## RLPG 雾化模型中的液滴直径关系\*

王中伟 周进 钟良生 庄逢辰

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

**摘要** 应用激光衍射瞬变喷雾场测量系统,进行了再生式液体炮(RLPG)环形喷嘴雾化特性的实验研究,得到了环形喷嘴瞬变喷雾场平均液滴直径的经验关系式,并与 RLPG 雾化模型中几个常用的液滴直径关系式进行了比较,得到了一些有价值的结论。

**关键词** 液滴直径,激光测量,再生式液体炮(RLPG)

**分类号** V 434.4

## Drop Size Correlation of Spray Models for RLPG

Wang Zhongwei Zhou Jin Zhong Liangsheng Zhuang Fengchen

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha 410073)

**Abstract** The atomization properties of annular injector in regenerative liquid propellant guns (RLPG) were experimentally investigated by using the laser measurement of the temporal droplet size distribution of liquid spray. Empirical expression for mean droplet size of the annular injector spray was obtained. Some drop size correlation of spray models for RLPG was discussed. Valuable conclusions were presented.

**Key words** droplet size, laser measurement, RLPG

在再生式液体炮(RLPG)工作过程中,液体药的喷射、雾化是一个复杂的瞬变过程,目前还不能对其进行精确描述。在内弹道模拟中一般采用简单的雾化模型,即假设液体药经喷嘴喷出后立即瞬时雾化成大小均匀的液滴,并用平均液滴直径来表示。因此,平均液滴直径的计算关系式是否合理,对于再生式液体炮雾化模型和内弹道模拟都十分重要。

Wolfe<sup>[1]</sup>, Cook<sup>[2]</sup>和 Taylor<sup>[3]</sup>等人根据大液滴或圆柱形液射流的雾化理论和实验,导出了平均液滴直径的关系式,在再生式液体炮内弹道模拟计算中得到广泛应用。然而,目前还不清楚这些液滴直径关系式是否适用于采用环形喷嘴结构的再生式液体炮。另外,有关环形喷嘴喷雾场平均液滴直径的实验和理论研究在国内外也未见有文献报道。因此,本文应用激光衍射瞬变喷雾场测量系统进行了环形喷嘴雾化特性的实验研究,以解答上述问题。

### 1 实验装置

根据再生式液体炮喷射装置的结构特点,本文设计了如图 1 所示的环形喷嘴。该喷嘴由中心杆和喷嘴座两部分组成,通过螺纹连接,中心杆顶端带有锥角。通过调节中心杆的位置,可形成不同大小的环形间隙,从而能够模拟再生式液体炮喷射装置不同工作阶段的雾化情况。

图 2 所示为激光衍射瞬变喷雾场测量系统,由气源阀门 1 同步触发控制电路 2 高喷注压降模拟

\* 校实验研究基金资助项目  
1997年 8月收稿  
第一作者:王中伟,1965年生,副教授

雾化实验装置 3 压力测量系统 4 采样延时控制电路 5 He-Ne激光发生器 6 激光测量控制系统 7和计算机 8等部分组成。模拟雾化实验装置<sup>[4]</sup>由气室、贮液室、差动活塞和环形喷嘴等部分组成。在气室中充入高压气体 (< 10M Pa) 推动差动活塞运动以产生高喷注压降 (20~ 30M Pa), 挤压贮液室中的液体经环形喷嘴喷射到环境中先形成液膜, 液膜在气动力、表面张力等作用下发生扰动导致液膜破碎, 形成大小不等的液滴。在本文实验中实验工质为水, 环境为常温常压静止大气。

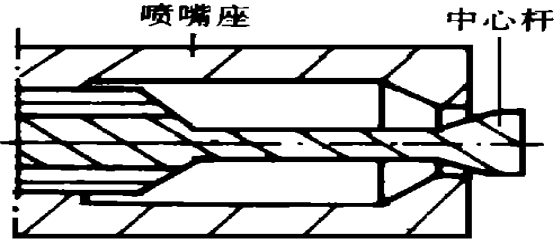


图 1 环形喷嘴示意图

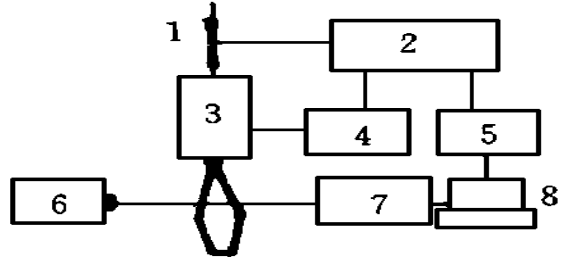


图 2 实验测量系统示意图

压力测量系统选用 SYC -250/1000型压力传感器, 用 XR-30C型磁带记录仪记录压力信号。压力传感器自振频率为 95KHz, 可测最高工作压力为 100M Pa。激光衍射测粒仪为 Malvern2604C型, 采样时间为 10<sup>-6</sup> s(微秒), 仪器测量误差为 4%, 其接收透镜焦距为 300mm, 可测粒子尺寸范围为 5.8~ 564 $\mu$ m。激光测粒仪配备有专用计算机和测量控制软件及实验数据处理软件, 在同步延时电路控制下即可测量环形喷嘴雾化过程中任一时刻瞬变喷雾场的雾化特性, 得到液滴直径的空间分布、时间分布<sup>[5]</sup>和平均直径的经验关系式

## 2 实验结果

喷嘴的雾化质量可由喷雾场的各种平均液滴直径来表示, 本文采用索特尔平均液滴直径 SM D (Sauter Mean Diameter), 其定义为:  $SM D = \int D_i^3 dn_i / \int D_i^2 dn_i$

实验表明: 环形喷嘴瞬变喷雾场平均液滴直径 SM D 与喷注压降  $\Delta P$  成相反的变化趋势。喷注压降  $\Delta P$  增大时平均液滴直径 SM D 减小, 喷注压降  $\Delta P$  减小时平均液滴直径 SM D 增大。根据雾化理论可知, 影响喷雾平均液滴直径的主要因素有液体的表面张力、喷射速度、粘性系数和液膜初始厚度等, 其中喷注压降主要影响液体喷射速度。当喷注压降较低时, 液体喷射速度较小, 使气液相对速度减小, 气动作用减弱, 液膜破碎后形成较粗的液滴, 平均液滴直径 SM D 较大; 当喷注压降较高时, 液体喷射速度较大, 使气液相对速度增大, 气动作用增强, 液膜破碎后形成较细的液滴, 平均液滴直径 SM D 较小。因此, 环形喷嘴平均液滴直径 SM D 随着喷注压降  $\Delta P$  的增大而减小, 随  $\Delta P$  的减小而增大

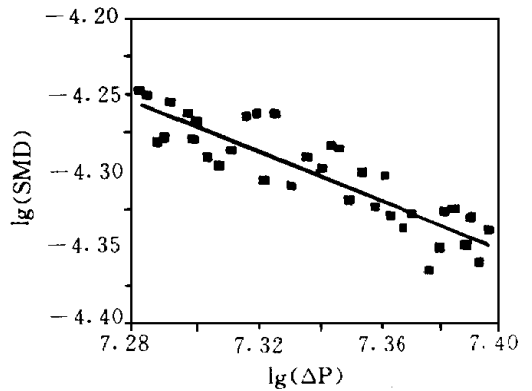


图 3 lg(SMD) ~ lg(ΔP) 关系曲线

分别将平均液滴直径 SM D 和喷注压降  $\Delta P$  的实验数据取对数, 得到如图 3 所示的实验结果。拟合实验数据得到  $lg(SMD) \sim lg(\Delta P)$  关系曲线为:

$$lg(SMD) = -0.7855lg(\Delta P) + 1.4640 \tag{1}$$

由 (1) 式即可得到环形喷嘴喷雾场平均液滴直径 SM D 随喷注压降  $\Delta P$  变化的经验关系式为:

$$SMD = 29.10717(\Delta P)^{-0.7855} \tag{2}$$

### 3 液滴直径关系式的比较

Wolfe, Cook和 Taylor等人<sup>[1-3]</sup>导出的平均液滴直径关系式是目前再生式液体炮内弹道模拟计算中应用较多的 3个关系式。将这些关系式与本文由环形喷嘴实验结果拟合得到的经验关系式 (2) 进行比较, 以检验它们是否适用于环形喷嘴。

Wolfe, Anderson<sup>[1]</sup>认为大液滴雾化的基本原理同样适用于液射流雾化, 并据此导出平均液滴直径的关系式为:

$$SMD = 3.2396(d_0 \Delta P)^{-2/3} (de)^{1/2} D_0^{1/6} U^{-1/3} \quad (3)$$

式中,  $D_0$  为圆柱形液射流的直径或环形液射流的外直径。上式单位为  $g, cm, s$ 制。

Cook, Woodley<sup>[2]</sup>在密闭爆发器中进行了液体药的实验, 根据实验结果整理得到直孔喷嘴雾化的平均液滴直径的关系式为:

$$SMD = 1.2U^{-1.8} = 0.643064d^9 (\Delta P)^{-0.9} \quad (4)$$

上式适用范围为: 喷孔直径为 1~2mm, 液体喷射速度为 30~3000m/s

Taylor<sup>[3]</sup>根据稳定性理论分析导出直孔喷嘴圆柱形液射流雾化的平均液滴直径关系式为:

$$SMD = \frac{2cX_m}{d_0 U^2} = cd_0 X_m d_0^{-1} (\Delta P)^{-1} \quad (5)$$

式中,  $X_m$  为最优扰动波波长参量, 根据液滴形成参量  $B$  的值由图 4 确定。液滴形成参量  $B$  则由下式给出:

$$B = \frac{d}{d_0} \left( \frac{e}{U} \right)^2 = \left( \frac{de}{U} \right)^2 \frac{1}{2d_0 \Delta P} \quad (6)$$

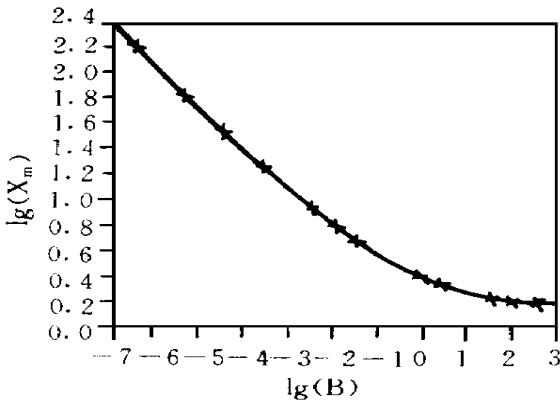


图 4  $lg(X_m) \sim lg(B)$  关系曲线

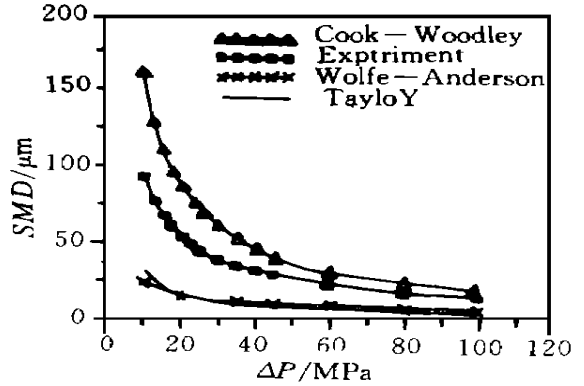


图 5 液滴直径关系式的比较

由式 (2) ~ (5) 得到的平均液滴直径与喷注压降的关系曲线如图 5 所示。由图可知, 上述 4 个关系式定性反映了平均液滴直径随喷注压降变化的规律, 即平均液滴直径随着喷注压降的增大而逐渐减小。在定量比较方面, 由 Wolfe-Anderson 公式、Cook-Woodley 公式和 Taylor 公式得到的平均液滴直径与环形喷嘴经验关系式 (2) 得到的结果相比, 误差较大, 相对误差均在 40~75% 范围内, 其中由 Cook-Woodley 公式得到的计算结果偏大, 由 Wolfe-Anderson 公式和 Taylor 公式得到的计算结果偏小。有意思的是, Wolfe-Anderson 公式和 Taylor 公式的计算结果非常接近, 定量计算误差几乎可忽略。不过 Wolfe-Anderson 公式在工程应用中更为方便一些。

由上述比较可知, 目前在再生式液体炮内弹道模拟计算中常用的 3 个平均液滴直径关系式, 即 Wolfe-Anderson 公式、Cook-Woodley 公式和 Taylor 公式, 应用于环形喷嘴雾化模拟计算时仅可作定性讨论, 定量计算将会带来很大的误差。

### 4 结论

(1) 根据环形喷嘴雾化实验结果, 本文得到了环形喷嘴喷雾平均液滴直径随喷射压降变化的经验

关系式。

(2) 目前在再生式液体炮内弹道模拟计算中常用的三个平均液滴直径关系式, 即 W olfe-A nderson 公式、Cook W oodley 公式和 T ay lor 公式, 应用于环形喷嘴雾化模拟计算时仅可作定性讨论, 定量计算将会带来很大的误差, 相对误差均在 40~ 75% 范围内。

(3) 由 W olfe-A nderson 公式和 T ay lor 公式得到的平均液滴直径计算结果非常接近。

## 参考文献

- 1 W olfe H E and A ndersen W H. K inetics M echanism and Resu ltant Sizes of the A erodyn amic Breakup of L iquid Drops. A eroj et Re-  
port 0395-04 (18) SP, 1964
- 2 Cook G C and W oodley C R. UK A ctivities on Regenerativ e L iquid Propellant Gun Research. 11st International Symposium on Ballis-  
tics, 1989
- 3 T aylor G I Generation of R ipples by W ind B low ing over a V iscosus F luid. Collected W orks of T aylor G I 3, 1940
- 4 王中伟. 再生式液体炮环形喷嘴雾化过程的试验和理论研究 [博士学位论文]. 国防科技大学, 1995
- 5 王中伟等. RLPG 环形喷嘴雾化特性的实验研究. 弹道学报, 1997, (2): 6~ 10